

環境の不確かさと通信遅延を考慮したマスタ・スレーブシステムのロバスト制御

著者	滑川 徹, 林 鋭渠, 伊藤 智, 河田 久之輔
雑誌名	日本機械学会論文集C編
巻	72
号	721
ページ	2821-2828
発行年	2006-09-01
URL	http://hdl.handle.net/2297/3748

環境の不確かさと通信遅延を考慮した マスタ・スレーブシステムのロバスト制御*

滑川 徹^{*1}, 林 鋭渠^{*2}, 伊藤 智^{*3}, 河田久之輔^{*4},

Robust Control Design for a Master-Slave Robotic System Considering Environmental Uncertainties and Communication Delay

Toru NAMERIKAWA^{*5}, Ruiqu LIN, Satoshi ITO and Hisanosuke KAWADA

^{*5} Division of Electrical Engineering and Computer Science, Kanazawa University
Kakuma, Kanazawa 920-1192 Japan

In this paper, a linear robust control system design based on μ -synthesis is proposed for impedance shaped 2-DOF robot manipulators in bilateral master-slave robotic system with environmental uncertainties and communication delay.

A general condition based on the structured singular value μ for robustness of a bilateral master-slave robotic system is derived. The proposed control methodology can guarantee the robust stability and the robust performance for environmental uncertainty, perturbation of operator dynamics, perturbation of master and slave robot manipulator dynamics and constant communication delay of the master-slave robotic system. Several experimental results show the effectiveness of our proposed approach for various environmental uncertainties and constant communication delay.

Key Words : Robust Control, Master-Slave Robotic System, μ -Synthesis, Environmental Uncertainties, Constant Communication Delay

1. は じ め に

マスタ・スレーブシステムはオペレータが指令するマスタマニピュレータの動きを、遠隔地のスレーブマニピュレータに追従させるロボットシステム^{(1)~(3)}である。特にスレーブからマスタへ力のフィードバックを行なうバイラテラル制御は作業性能の改善に有効である。バイラテラルマスタ・スレーブシステムは未知の環境及びオペレータに接触することから、様々な環境及びオペレータ特性に対して安定性を保証することが必要である。またマスタとスレーブが通信路によって結合されるため、通信遅延に対する安定性を保証することも必要である。これまで環境やオペレータ特性の不確かさを考慮した研究^{(4) (5)}や、通信遅延を考慮した研究⁽⁶⁾が行なわれている。しかし、これらの不確かさと通信遅延に対して統合的な補償が行なわれておらず、また多自由度ロボットに対する適用例も少ない。

本研究では、多自由度マニピュレータを用いて環境

及びオペレータ特性の不確かさと通信遅延に対するロバスト性能を統合的に保証した制御系設計を行なう。

まず、2 台の 2 自由度マニピュレータを用いてマスタ・スレーブシステムを構築する。それぞれのマニピュレータに対してインピーダンス整形を行うことで、非干渉・線形化を行う。また、環境及びオペレータの動特性をインピーダンスモデルとして表現する。そして、マスタ、スレーブ、環境、オペレータを統合化した一般化プラントを構成する。得られた一般化プラントに対してマスタ及びスレーブの不確かさ、環境及びオペレータの不確かさ、通信遅延を考慮した μ -Synthesis に基づく制御系設計法を提案する。これは、マスタ・スレーブシステムのロバスト性に対して、構造化特異値 μ に基づく一般的な条件を導出することになる。提案する制御方法は、マスタ・スレーブシステムのロバスト安定性とロバスト性能を保証するものとなる。最後に、制御実験を行うことで、環境の不確かさと時不変の通信遅延に対して提案法が有効であることを示す。

2. 2 自由度ロボットマニピュレータで構成されたマスタ・スレーブシステムの動特性

マスタ・スレーブシステムを 2 自由度のマスタマニピュレータ、2 自由度のスレーブマニピュレータ、オ

* 原稿受付 2005 年 12 月 27 日

^{*1} 正員, 金沢大学大学院自然科学研究科 (〒 920-1192 金沢市角間町)

^{*2} クリーン・テクノロジー株式会社

^{*3} 長岡技術科学大学大学院工学研究科

^{*4} 金沢大学大学院自然科学研究科

Email: toru@t.kanazawa-u.ac.jp

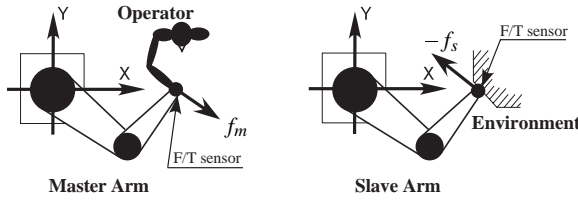


Fig. 1 Master-Slave system with 2-DOF manipulators

ペレータ及び環境を用いて、図1のように構成する。

2.1 2自由度マニピュレータの運動方程式 マスタマニピュレータ及びスレーブマニピュレータの運動方程式は、それぞれ以下の方程式で与えられる⁽⁷⁾。

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau_m + J^T(\theta)f_m \quad (1)$$

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau_s - J^T(\theta)f_s \quad (2)$$

ここで、 $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ はそれぞれリンクの角度、角速度、角加速度である。 $M(\theta)$ は慣性行列、 $C(\theta, \dot{\theta})$ は遠心力およびコリオリ力項、 $G(\theta)$ は重力項である。 τ_m, τ_s はそれぞれ、マスタ及びスレーブの入力トルクベクトルである。 f_m, f_s はそれぞれオペレータからマスタへの力ベクトル、スレーブから環境への力ベクトルである。 $J(\theta)$ はヤコビ行列である。

作業座標系でのエンドエフェクタの位置を表すベクトル $X(t) = [x(t), y(t)]^T$ と関節角度 $\theta = [\theta_1, \theta_2]^T$ の関係は順運動学 $P(\theta)$ より次式のように与えられる。

$$X = P(\theta) \quad (3)$$

(3) 式の両辺を時間微分することにより、エンドエフェクタの速度と関節角速度との関係は、ヤコビ行列 $J(\theta)$ を用いて次式で与えられる。

$$\dot{X} = J(\theta)\dot{\theta} \quad (4)$$

さらに、(4) 式の両辺を時間微分することにより、加速度の関係式は次式で与えられる。

$$\ddot{\theta} = J^{-1}(\theta)(\ddot{X} - \dot{J}(\theta)\dot{\theta}) \quad (5)$$

2.2 インピーダンス整形によるマニピュレータの非干渉・線形化 ここでは、非線形なマニピュレータの運動方程式に対して、作業座標系のインピーダンス整形を適用することで非干渉・線形化を行う⁽⁷⁾⁽⁸⁾。まず、マスタ及びスレーブのインピーダンス整形された表現が次式のように与えられるとする⁽⁷⁾。

$$M_m\ddot{X}_m + D_m\dot{X}_m + K_mX_m = Z_m\ddot{X}_m = f_{km} + f_m \quad (6)$$

$$M_s\ddot{X}_s + D_s\dot{X}_s + K_sX_s = Z_s\ddot{X}_s = f_{ks} - f_s \quad (7)$$

ここで、望ましいマスタとスレーブのインピーダンス Z_m, Z_s を以下のように設定する。

$$Z_m = M_ms + D_m + \frac{K_m}{s} \quad (8)$$

$$Z_s = M_ss + D_s + \frac{K_s}{s} \quad (9)$$

$M_m, M_s, D_m, D_s, K_m, K_s$ はすべて 2×2 の実行列で、マスタ及びスレーブのインピーダンスモデルにおける質量行列、粘性係数行列、バネ係数行列である。ただし、本稿では標準的な仮定として $K_m = K_s = 0$ とした。

f_{km} と f_{ks} はマスタ及びスレーブのアクチュエータによる力であり、作業座標ではそれぞれ、 $f_{km} = [f_{kxm}, f_{kym}]^T$, $f_{ks} = [f_{kxs}, f_{kys}]^T$ と定義する。

マスタをインピーダンス整形するための制御則は、(1) 式に (5) と (6) 式を代入することで、次式のように与えられる。

$$\tau_m = M(\theta)\{M_mJ(\theta)\}^{-1}\{-M_mJ(\theta)\dot{\theta} - D_mJ(\theta)\dot{\theta} + f_m + f_{km}\} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) - J^T(\theta)f_m \quad (10)$$

同様に、スレーブをインピーダンス整形するための制御則は、次式のように与えられる。

$$\tau_s = M(\theta)\{M_sJ(\theta)\}^{-1}\{-M_sJ(\theta)\dot{\theta} - D_sJ(\theta)\dot{\theta} - f_s + f_{ks}\} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + J^T(\theta)f_s \quad (11)$$

これらの制御則は、(6)～(9) 式を適切に設定することで、理想的なインピーダンスを実現することができ、マスタの操作性を任意に指定することができる。

2.3 環境及びオペレータの動特性 環境及びオペレータの動特性は、それぞれ次のインピーダンスモデルで表現する。

$$Z_{op}(s)\dot{X}_m = f_{op} - f_m \quad (12)$$

$$Z_{env}(s)\dot{X}_s = f_s \quad (13)$$

ここで、 f_{op} は、オペレータの筋力による外力である。オペレータのインピーダンス Z_{op} と環境のインピーダンス Z_{env} をそれぞれ次式のように定義する。

$$Z_{op}(s) = M_{op}s + D_{op} + \frac{K_{op}}{s} \quad (14)$$

$$Z_{env}(s) = M_{env}s + D_{env} + \frac{K_{env}}{s} \quad (15)$$

$M_{op}, M_{env}, D_{op}, D_{env}, K_{op}, K_{env}$ はすべて 2×2 の実行列で、それぞれインピーダンスモデルの質量行列、粘性係数行列、バネ係数行列である。

3. 制 御 系 設 計

3.1 フィードバック制御系の構成 インピーダンス整形されたマスタ及びスレーブ、環境、オペレータのフィードバック制御系は図2のように構成する。

フィードバックコントローラ $K_x(s)$, $K_y(s)$ を作業座標系での X , Y 軸方向に対してそれぞれ独立に設計する．また，問題設定として X , Y 軸方向の両方の動特性の挙動が同じになるようにする．よって， X 軸方向だけのフィードバック制御系を設計し， Y 軸方向の制御系は $K_x(s) = K_y(s)$ とする．

以降では， X 軸方向に対する制御系設計だけを扱う．

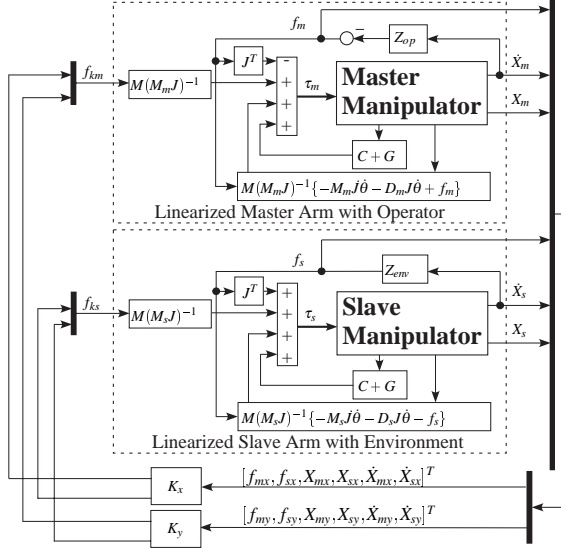


Fig. 2 Feedback control system

3.2 位置と速度に対する制御性能 この節では，マスタ・スレーブシステムの位置と速度に対する制御性能を定式化する．マスタ・スレーブシステム自体を図3に示すような仮想インピーダンスで表現する⁽⁴⁾．この数学モデルは(16)式のように与えられる．

$$f_{mx} - f_{sx} = Z_i(s)v_{ms} \quad (16)$$

ただし，

$$Z_i(s) = m_i s + d_i + \frac{c_i}{s}, \quad v_{ms} = \frac{v_m + v_s}{2} \quad (17)$$

である．ここで $Z_i(s)$ は仮想的なインピーダンスであり， m_i , d_i , c_i はそれぞれ，仮想的な質量，粘性，バネ定数である． v_{ms} はマスタの速度とスレーブの速度の平均値である．

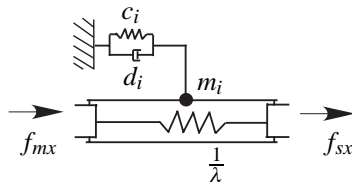


Fig. 3 Intervening impedance model

位置誤差 e とマスタ・スレーブシステムの望ましい誤差 e_d を次式のように考える．

$$e = x_m - x_s, \quad e_d = \lambda \frac{f_{mx} + f_{sx}}{2} \quad (18)$$

ここで， x_m , x_s はそれぞれ，マスタ及びスレーブの位置である．

(16) 式は外力に対する平均速度の挙動を示しており，これによって，システム全体が望ましいインピーダンス特性 $Z_i(s)$ となる．(18) 式は，マスタ及びスレーブの位置誤差の挙動を表わすものであり， $\lambda (\geq 0)$ は，マスタ及びスレーブの相対位置を調整するためのコンプライアンスパラメータである⁽⁴⁾．

外力に対する目標速度 v_{msd} を

$$v_{msd} = \frac{1}{Z_i} (f_{mx} - f_{sx}) \quad (19)$$

のように与えることで，制御性能の指標 e_{rel} , e_{abs} は次式のように定義する．

$$e_{rel} = e_d - e, \quad e_{abs} = v_{msd} - v_{ms} \quad (20)$$

以上より，制御性能に対する制御問題は，2つの指標 e_{rel} , e_{abs} を同時に最小化するようなコントローラ $K_x(s)$ を見つけることである．

3.3 インピーダンスモデルの不確かさに対するロバスト性 マスタ及びスレーブのインピーダンスモデル $Z_m(s)$, $Z_s(s)$ の X 軸要素 $Z_{mx}(s)$, $Z_{sx}(s)$ を次式のように定義する．

$$Z_{mx}(s) = \hat{Z}_{mx}(s) + \delta Z_{mx}(s) \quad (21)$$

$$Z_{sx}(s) = \hat{Z}_{sx}(s) + \delta Z_{sx}(s) \quad (22)$$

ここで， $\hat{Z}_{mx}(s)$, $\hat{Z}_{sx}(s)$ はノミナルモデルである． $\delta Z_{mx}(s)$, $\delta Z_{sx}(s)$ は，無視された非線形性や外乱による不確かさである．

δZ_{mx} , δZ_{sx} は以下で定義する．

$$\delta Z_{mx}(s) = \delta m_m s + \delta b_m \quad (23)$$

$$\delta Z_{sx}(s) = \delta m_s s + \delta b_s \quad (24)$$

ここで， δm_m , δm_s , δb_m , δb_s は，インピーダンスモデルの慣性，粘性係数である．インピーダンスモデルの不確かさの範囲を次式のように仮定する．

$$|\delta m_m| \leq \Delta m_m, |\delta m_s| \leq \Delta m_s, |\delta b_m| \leq \Delta b_m, |\delta b_s| \leq \Delta b_s \quad (25)$$

ここで，不確かさの最大値 Δm_m , Δm_s , Δb_m , Δb_s を用いて重み関数 $W_m(s)$, $W_s(s)$ を次式のように定める．

$$W_m(s) = \Delta m_m s + \Delta b_m,$$

$$W_s(s) = \Delta m_s s + \Delta b_s \quad (26)$$

最終的に次式のような．

$$\begin{aligned} |\delta Z_{mx}(j\omega)| &= \sqrt{\delta m_m^2 \omega^2 + \delta b_m^2} \leq \sqrt{\Delta m_m^2 \omega^2 + \Delta b_m^2} \\ &= |W_m(j\omega)|, \quad \forall \omega \in R \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} |\delta Z_{sx}(j\omega)| &= \sqrt{\delta m_s^2 \omega^2 + \delta b_s^2} \leq \sqrt{\Delta m_s^2 \omega^2 + \Delta b_s^2} \\ &= |W_s(j\omega)|, \quad \forall \omega \in R \end{aligned} \quad (28)$$

これらの方程式は， Δ_m, Δ_s ($\|\Delta_m\|_\infty \leq 1, \|\Delta_s\|_\infty \leq 1$) を用いることで次式のように表現できる．

$$\begin{aligned} Z_{mx}(s) &= \hat{Z}_{mx}(s) + \delta Z_{mx}(s) \\ &= \hat{Z}_{mx} + W_m \Delta_m \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} Z_{sx}(s) &= \hat{Z}_{sx}(s) + \delta Z_{sx}(s) \\ &= \hat{Z}_{sx} + W_s \Delta_s \end{aligned} \quad (30)$$

これは，不確かさを含むマスタ及びスレーブのインピーダンスモデルとなる．

3.4 オペレータと環境の不確かさに対するロバスト性 前節と同様に，オペレータのインピーダンス $Z_{mx}(s)$ と環境のインピーダンス $Z_{sx}(s)$ の不確かさを δZ_{op} , δZ_{env} として定義し，それぞれ次式のようにノルム有界であると仮定する．

$$|\delta Z_{op}(j\omega)| \leq |W_{op}(j\omega)|, \quad \forall \omega \in R \quad (31)$$

$$|\delta Z_{env}(j\omega)| \leq |W_{env}(j\omega)|, \quad \forall \omega \in R \quad (32)$$

従って，不確かさを含む環境及びオペレータのインピーダンスモデル $Z_{mx}(s)$, $Z_{sx}(s)$ は次式のように表現できる．

$$\begin{aligned} Z_{op}(s) &= \hat{Z}_{op}(s) + \delta Z_{op}(s) \\ &= \hat{Z}_{op} + W_{op} \Delta_{op} \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} Z_{env}(s) &= \hat{Z}_{env}(s) + \delta Z_{env}(s) \\ &= \hat{Z}_{env} + W_{env} \Delta_{env} \end{aligned} \quad (34)$$

ここで， $\hat{Z}_{op}(s)$, $\hat{Z}_{env}(s)$ はノミナルモデルである． Δ_{op} , Δ_{env} は， $\|\Delta_{op}\|_\infty \leq 1$, $\|\Delta_{env}\|_\infty \leq 1$ となるような不確かさの範囲である．

3.5 通信遅延に対するロバスト性 通信遅延 $e^{-j\omega T}$ は無限次元の有理伝達関数となり，モデルによって厳密には表現できないことがよく知られている．しかし， H_∞/μ 制御の枠組みの中では，図4に示すようなプラントモデルの乗法的な不確かさとして扱うことができる．よって，任意の ω , $0 < L < L_{max}$ に対して次式の不等式が成り立つ⁽⁶⁾．

$$|e^{-j\omega L} - 1| \leq \left| \frac{2.1j\omega}{j\omega + \frac{1}{L_{max}}} \right| \quad (35)$$

通信遅延 e^{-Ls} ($0 < L < L_{max}$) は，次式で与えられる重み関数 W_l と不確かさ Δ_l ($\|\Delta_l\|_\infty \leq 1$) を用いることで乗法的な不確かさとして表現できる．

$$W_l(s) = \frac{2.1s}{s + \frac{1}{L_{max}}} \quad (36)$$

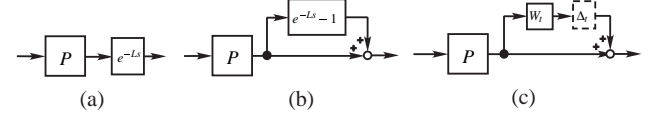


Fig. 4 Communication delay uncertainty

3.6 一般化プラントの構成 制御目的は以下のようになる．

- 位置と速度に対する制御性能
- インピーダンスモデルの不確かさに対するロバスト性
- オペレータと環境の不確かさに対するロバスト性
- 通信遅延に対するロバスト性

この複数の制御目的を μ -Synthesis の枠組みで同時に達成するために，図5のような一般化プラントを構成する． d_m , d_s はマスタ及びスレーブマニピュレータの力外乱であり， W_d はそれに対する重み関数である． $W_{rel}(s)$, $W_{abs}(s)$ は制御性能に対する重み関数である． $W_{um}(s)$, $W_{us}(s)$ は制御入力に対する重み関数である． n_v はセンサ外乱である．

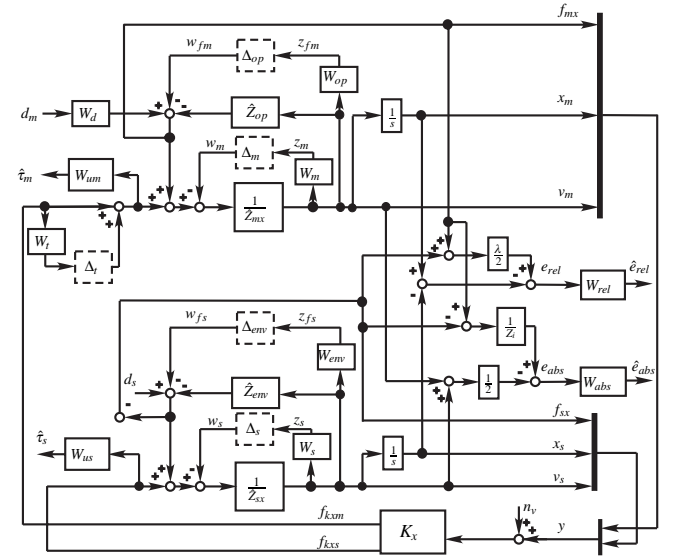


Fig. 5 Generalized plant with uncertainties

また，ロバスト性能問題を定式化するために，仮想的な性能に対する不確かさ Δ_{perf} ($\|\Delta_{perf}\|_\infty \leq 1$) を導入する．そして，図5の一般化プラントは，図6の構

造的不確かさを持つ LFT 形式に変換することができ、次式のようなブロック構造 Δ_{mss} が与えられる。

$$\Delta_{mss} = \text{diag}[\Delta_{op}, \Delta_{env}, \Delta_m, \Delta_s, \Delta_t, \Delta_{perf}] \quad (37)$$

ここで、6つの不確かさは適切な次元の複素行列である。また、それらの H_∞ ノルムは1以下である。

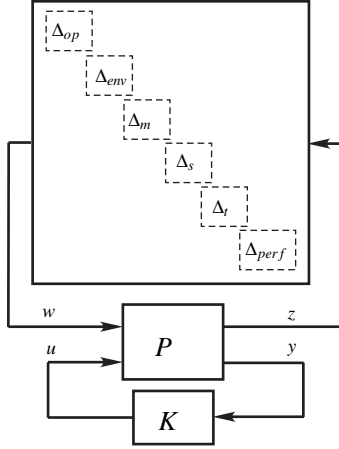


Fig. 6 Robust performance framework

よって、ロバスト性能条件は次式で与えられる。

$$\sup_{\omega \in R} \mu_{\Delta_{mss}}[F_l(P(j\omega), K(j\omega))] < 1 \quad (38)$$

4. 制御実験による検証

4.1 制御系設計 まず、各インピーダンスモデルのパラメータを次のように設定する。

$$\begin{aligned} m_m &= m_s = 2.0[\text{kg}], & d_m &= d_s = 0.2[\text{Ns/m}] \\ m_{op} &= 1.0[\text{kg}], & d_{op} &= 2.0[\text{Ns/m}], & k_{op} &= 10.0[\text{N/m}] \\ m_{env} &= 0[\text{kg}], & d_{env} &= 0[\text{Ns/m}], & k_{env} &= 100.0[\text{N/m}] \\ m_i &= 1.0[\text{kg}], & d_i &= 0.01[\text{Ns/m}], & c_i &= 0[\text{N/m}] \\ \lambda &= 0[\text{m/N}] \end{aligned}$$

ロバスト制御系設計の設計パラメータは、制御実験による試行錯誤により最終的に以下のように設定した。

$$\begin{aligned} W_{rel} &= \frac{2200}{s+10}, & W_{abs} &= \frac{80}{s+10} \\ W_{um} &= W_{us} = \frac{0.1s+0.01}{s+1000}, & W_d &= 1 \end{aligned}$$

コントローラを計算するための設計パラメータが、次のような不確かさを含むように図5の一般化プラントを構成する。

- 許容できる最大通信遅延 $L_{max} = 15[\text{msec}]$
- マスタ及びスレーブのインピーダンスモデルの不確かさ 5%

- オペレータのインピーダンスモデルの不確かさ 20%

- 環境のインピーダンスモデルの不確かさ 10%

実際のインターネットを介したテレオペレーションについては文献⁽¹⁰⁾で議論されている。15[msec]の通信時間遅れとは数10[km]程度離れた地点とのインターネット通信時間に相当する。

以上の設定で、MATLABの μ -Analysis and Synthesis Toolboxを用いて2回の $D-K$ イタレーションにより閉ループシステムの μ の値は1以下となった。よって、ロバスト性能条件が達成できたことになる。図7に μ の値を示す。

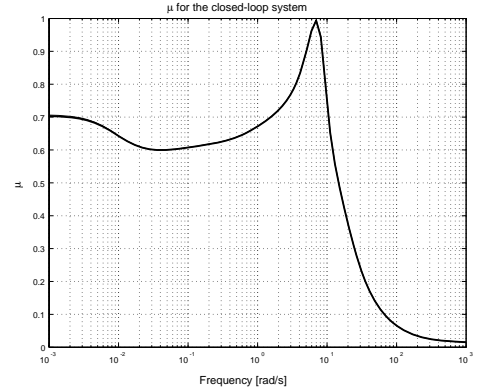


Fig. 7 μ plot of the closed-loop system

4.2 実験条件 図8に示すように、スレーブのみがバネに拘束された実験環境を構成する。通信遅延は仮想的にホストコンピュータの中で発生させる。

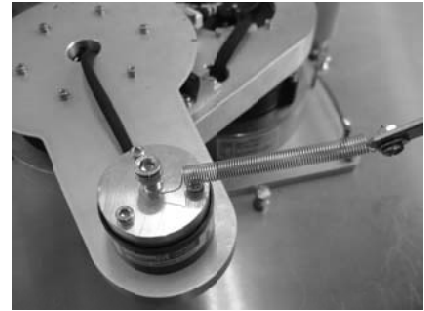


Fig. 8 Slave manipulator and spring environment

実験環境は以下とする。

- Case 1: スレーブはバネ ($k_1 = 100[\text{N/m}]$) に拘束され、通信遅延は0[msec]とする。
- Case 2: スレーブはバネ ($k_2 = 110[\text{N/m}]$) に拘束され、通信遅延は15[msec]とする。

4.3 実験結果と考察 提案法と比較するために、図9に示すような従来の力帰還型 (FRST) コントローラを用いたマスタ・スレーブシステムを構成した。

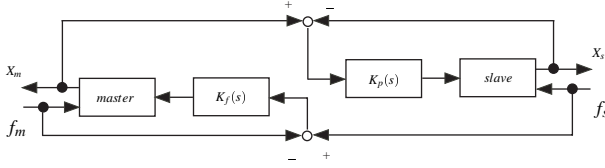


Fig. 9 Force reflecting servo type (FRST)

Table 1 Parameters of $K_f(s)$ and $K_p(s)$

	Case1	Case2
K_{pf}	3	1
K_{pp}	350	300
K_{dp}	50	20

マスタに対しては力フィードバックを行い，次のような P コントローラ $K_f(s)$ を用いる．

$$K_f(s) = K_{pf} \quad (39)$$

ここで， K_{pf} は比例ゲインである．

一方，スレーブに対しては位置フィードバックを行うが，高周波領域の振動を回避するために，次のような極を一つ付加した PD コントローラ $K_p(s)$ を用いる．このコントローラ $K_p(s)$ を用いることで，高周波の制御ゲインが抑えられるようにした．

$$K_p(s) = \frac{K_{dp}s + K_{pp}}{as + 1} \quad (40)$$

ここで， K_{pp}, K_{dp} はそれぞれ，比例ゲインと微分ゲインである． $a = 7 \times 10^{-3}$ とする． K_{pf}, K_{pp}, K_{dp} は，それぞれの実験環境において表 1 に示すように調整した．

X 軸の実験結果は Y 軸と同じとなる．よって，ここでは Y 軸の結果のみを示す．図 10 は，Case 1 の環境での μ コントローラと FRST コントローラの実験結果である．それぞれ，Y 軸方向の位置と力の時間応答を示している．この結果から，2 つのコントローラは両方とも安定性を保証している．図 11 は，Case 2 の環境での実験結果である．この場合も，2 つのコントローラは安定性を保証している．しかし，FRST コントローラは大きな振動が見られる．図 12 は，2 つのコントローラのマスタ及びスレーブの間の位置誤差の絶対値を示している． μ コントローラの位置誤差の最大値は，(a)Case 1 では約 15[mm]，(b)Case 2 では約 25[mm] である．一方，FRST コントローラの位置誤差の最大値は，(a)Case 1 では約 19[mm]，(b)Case 2 では約 24[mm] である． μ コントローラとゲインを再調整した FRST コントローラの位置誤差の大きさを比較すると (a)Case 1 から (b)Case 2 への環境の変化に対し

てほぼ同じである．図 13 は力誤差の絶対値を示している． μ コントローラの力誤差の最大値は，(a)Case 1 では約 1[N]，(b)Case 2 では約 2[N] である．FRST コントローラを用いた場合の (b)Case 2 の力誤差は，コントローラゲインを再調整したとしても大きいことが確認できる．これは， μ コントローラの力誤差の大きさが，(a)Case 1 から (b)Case 2 への環境の変化に対して小さいことを示している．ここで，FRST のコントローラゲインはそれぞれの環境に対して実験的に調整されていることに注意されたい．一方， μ コントローラはすべての実験で同じものを用いている．これらの結果は， μ コントローラが環境の不確かさと通信遅延に対して良好なロバスト性能を有していることを意味する．

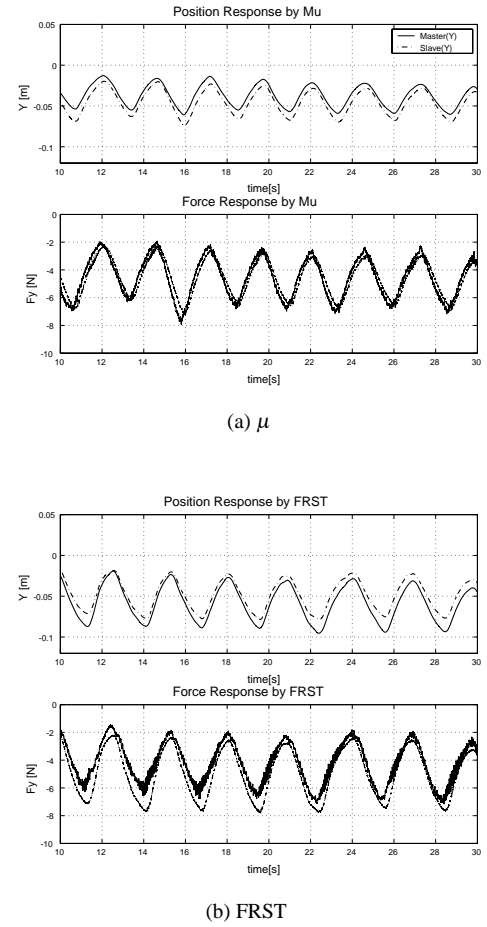
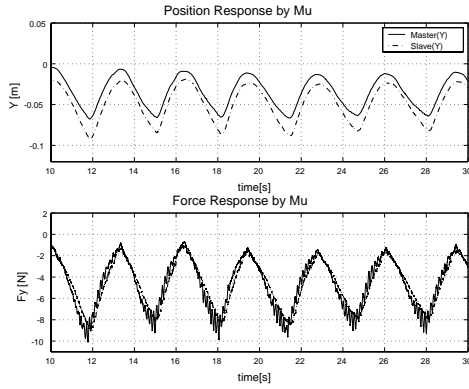


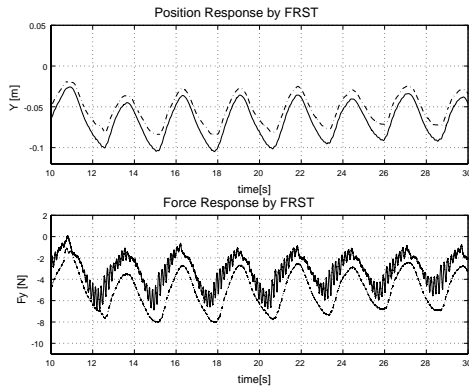
Fig. 10 Experimental results : Case 1 (Slave restricted by k_1 , with 0[msec] time delay)

5. お わ り に

本研究では，環境の不確かさと通信遅延を含むマスタ・スレーブシステムに対して μ -Synthesis に基づく



(a) μ



(b) FRST

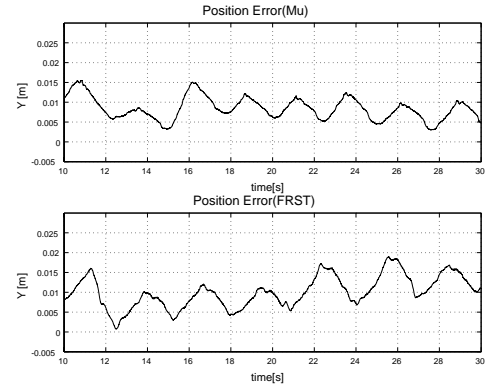
Fig. 11 Experimental results : Case 2 (Slave restricted by k_2 , with 15[msec] time delay)

制御系設計を提案した。

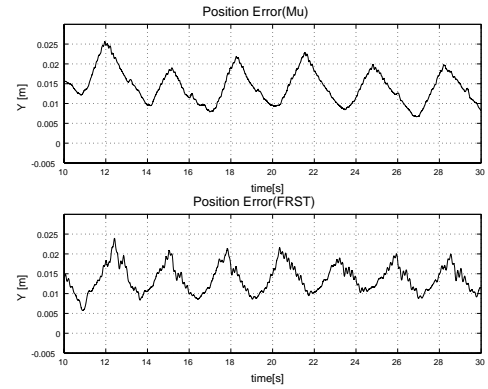
2自由度のマスタ及びスレーブの動特性をインピーダンス整形を用いることで非干渉・線形化した。また、環境及びオペレータの動特性はインピーダンスモデルを用いて表現した。2つのマニピュレータ、環境、オペレータから成るマスタ・スレーブシステムを統合することで一般化プラントを構成した。導出した一般化プラントに対して μ -Synthesis を用いることで、マスタ、スレーブ、環境、オペレータの不確かさと通信遅延を考慮した制御系を設計した。

提案する制御方法は、マスタ・スレーブシステムの以下に示すような不確かさに対してロバスト安定性とロバスト性能を保証することができる。

- 15[msec] の時不変の通信遅延
- マスタ及びスレーブのインピーダンスモデルの 5%の不確かさ
- オペレータのインピーダンスモデルの 20%の不確かさ



(a) Case 1



(b) Case 2

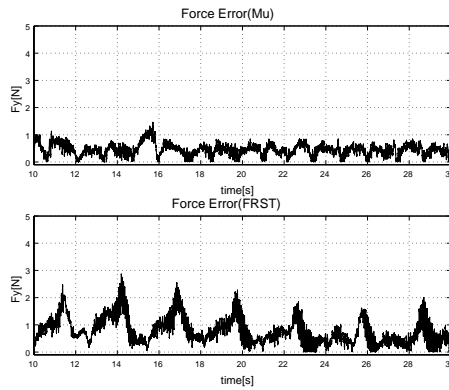
Fig. 12 Absolute value of all experimental position error data between master and slave manipulators

• 環境のインピーダンスモデルの 10%の不確かさ
実験結果より、環境及びオペレータの不確かさと通信遅延に対して提案法の有効性を示した。

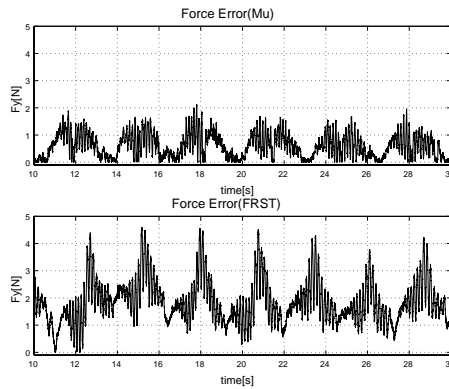
今後の課題としては、今回提案するロバスト制御法をインターネットなどの時変の通信遅延に対して拡張することである^{(11)~(14)}。

文 献

- (1) J. Edward Colgate, " Robust Impedance Shaping Telemanipulation, " IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 9, No. 4, pp. 374-384, 1993.
- (2) J. Yan and S. E. Salcudean, " Teleoperation controller design using H_∞ -optimization with application to motion-scaling, "IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 4, No. 3, pp. 244-258, 1996.
- (3) J. Ryu, D. Kwon, and B. Hannaford, " Stable Teleoperation With Time-Domain Passivity Control, " IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 20, No. 2, pp. 365-373, 2004.
- (4) T. Yoshikawa, Y. Yokokohji, N. Hosotani and J. Imura, " Robust Control of Master-Slave Systems Considering



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 13 Absolute value of all experimental force error data between master and slave manipulators

- Uncertainties of Environment and Operator, "Journal of the Robotics Society of Japan (in Japanese), Vol. 14, No. 6, pp. 836-845, 1996.
- (5) T. Namerikawa, Y. Satake and M. Fujita, " H_{∞} Control for a Master-Slave System Considered Environmental Uncertainty, "Proceedings of the JSME Annual Conference on Robotics and Mechatronics (in Japanese), 1994.
 - (6) G. M. H. Leung, B. A. Francis and J. Apkarian, " Bilateral Controller for Teleoperators with Time Delay via μ -Synthesis, " IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 11, No. 1, pp. 105-116, 1995.
 - (7) K. Kosuge, T. Itoh, T. Fukuda and M. Otsuka, "Task-Oriented Control of Telemanipulator Based on Passivity " Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (in Japanese), Series C, Vol. 61, No. 590, pp. 4007-4012, 1995.
 - (8) K. Kosuge, Y. Fujisawa and T. Fukuda, " Control of Man-Machine System Based on Virtual Tool Dynamics, " Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (in Japanese), Series C, Vol. 60, No. 572, pp. 1337-1343, 1994.
 - (9) C. Natale, Interaction Control of Robot Manipulators, Springer, Berlin, 2002.

- (10) R. Oboe and P. Fiorini, "A Design and Control Environment for Internet-Based Telerobotics," The International Journal of Robotics Research, Vol.17, No.4, pp.433-449, 1998.
- (11) Y. Yokokohji, T. Tsujioka, and T. Yoshikawa, " Bilateral Control with Time-Varying Delay including Communication Blackout, " Proceedings of the 10th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 285-292, 2002.
- (12) N. Chopra, M. W. Spong, S. Hirche and M. Buss, " Bilateral Teleoperation over the Internet: the Time Varying Delay Problem, " Proceedings of the 2003 American Control Conference, pp. 155-160, 2003.
- (13) P. Beresteky, N. Chopra, and M. W. Spong, " Theory and Experiments in Bilateral Teleoperation over the Internet " Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Control Applications, pp. 456-463, 2004.
- (14) S. Hirche and M. Buss, " Telepresence Control in Packet Switched Communication Networks " Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Control Applications, pp. 236-241, 2004.